



# Amélioration de la phase de détection du spectre d'un système radio cognitive pour le suivi temps réel de patients

Dramane Ouattara, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf, Omessaad Hamdi

## ► To cite this version:

Dramane Ouattara, Francine Krief, Mohamed Aymen Chalouf, Omessaad Hamdi. Amélioration de la phase de détection du spectre d'un système radio cognitive pour le suivi temps réel de patients. Nouvelles Technologies de la Répartition - Colloque francophone sur l'ingénierie des protocoles, NOTERE/CFIP, Nov 2012, France. pp.Pages 61-69. hal-01058586

**HAL Id: hal-01058586**

**<https://hal.science/hal-01058586>**

Submitted on 27 Aug 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Amélioration de la phase de détection du spectre d'un système radio cognitive pour le suivi temps réel de patients

Dramane OUATTARA\*, Francine KRIEF\*, Mohamed Aymen CHALOUF† et Omessaad HAMDI\*

\*Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique

Université Bordeaux, LaBRI, 351 cours de la Libération, 33405 TALENCE Cedex

Email: dramane.ouattara@labri.fr, francine.krief@labri.fr, ohamdi@labri.fr

†Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires, IRISA

Université de Rennes 1, IUT de Lannion, Rue Edouard Branly 22300 Lannion

Email: mohamed-aymen.chalouf@irisa.fr

**Abstract**—Le suivi régulier des signes vitaux garantit un traitement préventif des pathologies courantes chez une personne, lui assurant ainsi un meilleur état de santé. La majorité des solutions proposées dans ce contexte, repose sur un ensemble de capteurs sans fil hétérogènes équipant le patient et son environnement. Souvent, ces capteurs sont connectés à un nœud local intelligent jouant le rôle de passerelle vers l'extérieur. Le nœud local intelligent pourrait être fixe (medical Box) ou mobile (Smartphone) selon l'endroit où se trouve la personne suivie. Dans le cas où le patient est mobile, une des problématiques auxquelles nous pouvons être confrontés est la garantie d'une connectivité permanente du nœud local intelligent (par exemple un smartphone) avec l'extérieur. Pour répondre à cette problématique, nous avons besoin de définir une architecture de communication robuste, capable d'exploiter différentes technologies et standards, permettant aux équipements de disposer de bandes de fréquences garantissant les transmissions, sans contraintes temporelles et géographiques. La radio cognitive, proposant une occupation opportuniste du spectre et implémentant une fonction de détection des bandes libres, bien que propice, appelle à une prise en compte de la mobilité du patient et des changements de fréquence. La solution que nous proposons à cet effet, est un modèle d'anticipation et de prise de décision, prédisant l'état d'occupation de la bande de fréquences à sonder. Le modèle associe les techniques d'apprentissage artificiel au système Grey Model afin d'allier faible coût algorithmique et connectivité permanente par dissimulation du temps d'entraînement.

**Mots clés:** *radio cognitive, connectivité, Grey Model, Apprentissage Artificiel, mobilité spectrale, prédiction spectrale.*

## I. INTRODUCTION

L'émergence des nouveaux risques sanitaires, appelle à la conception de technologies capables d'assumer un rôle préventif et d'assurer une autonomie, un suivi permanent sans aucune contrainte liée à la localisation du patient. Ces technologies requièrent ainsi une constante connec-

tivité et une bonne qualité de communication. Dans ce contexte d'explosion des communications sans fil suscitant une rareté de la ressource spectrale, la radio cognitive se présente comme une alternative fiable et à moindre coût. En effet, cette technologie offre la possibilité d'une utilisation opportuniste des bandes de fréquences. Toutefois, subsiste un ensemble de problématiques en matière de détection de ces fréquences, de partage des canaux disponibles et de prise de décision qui corroborent le processus d'accès au spectre. En outre, les problèmes pouvant être causés par le changement de l'environnement radio suite à la mobilité d'un patient équipé d'un smartphone relié à un réseau de capteurs sans fil et exploitant la radio cognitive n'ont pas été suffisamment explorés. En effet, les travaux portant sur les communications dans les réseaux radio cognitive, mettent en évidence les nombreux défis à relever dont la gestion de la mobilité de l'utilisateur et celle du spectre. Dans ce papier, nous nous focalisons sur la prise en compte de la mobilité de l'utilisateur, qui n'est autre que le patient dans notre contexte de suivi temps réel de patient en tout lieu. Ce suivi est rendu possible grâce à la solution que nous proposons et qui est basée sur les techniques d'Apprentissage Artificiel (AA) associées au système Grey Model (GM) pour réaliser une prédiction spectrale qui va servir à identifier à l'avance les bandes libres afin d'anticiper les sauts fréquentiels. La suite de cet article est une définition en section II de la radio cognitive et un état de l'art situant cette technologie dans le contexte de suivi de patient en section III; Une description à travers un scénario du principe de suivi de patient en IV et la proposition du modèle de prédiction assemblant spectre et mobilité en section V; Enfin, la section VI présente les résultats de l'expérimentation et la section VII permet de conclure tout en ouvrant les perspectives de recherche.

## II. LA RADIO COGNITIVE

### A. Définition et principes de la radio cognitive

La Radio Cognitive [1] est un paradigme pour les communications sans fil dans lequel un réseau ou un nœud est capable de modifier de manière automatique ses paramètres de transmission ou de réception afin de communiquer efficacement tout en évitant les interférences avec d'autres utilisateurs agréés ou non [2]. Cette auto-configuration et auto-adaptation des paramètres basée sur un ensemble de modules, se fait à travers une surveillance active de plusieurs facteurs dans l'environnement interne ou externe à la radio tels que le spectre de la Radio Fréquence (RF), le comportement des utilisateurs et l'état du réseau.

### B. Les principaux modules de la cognition

La figure 1 résume l'ensemble des modules de la cognition; il s'agit d'un assemblage des fonctions de la radio cognitive.

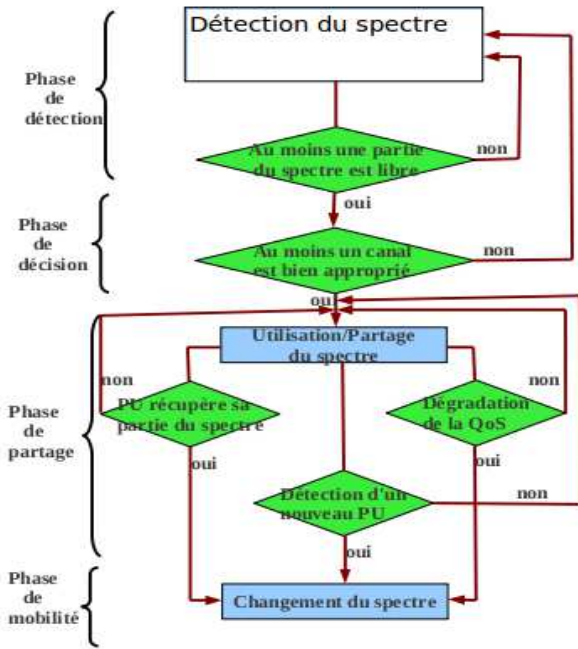


Fig. 1. Organigramme de fonctionnement d'un nœud radio cognitive[4]

1) *Le sondage/détection du spectre* : La sonde se définit comme étant la capacité à mesurer, scruter, apprendre et se rendre compte des paramètres liés aux caractéristiques du canal radio. Elle mesure la disponibilité du spectre, la puissance, les interférences et le bruit, scrute l'environnement radio de fonctionnement, les besoins des utilisateurs et des applications, les réseaux et les nœuds disponibles, les politiques locales et d'autres restrictions des opérateurs.

2) *La prise de décision spectrale* : La prise de décision repose sur le choix du canal de communication approprié justifiant de la qualité de service requise pour la transmission des informations collectées. La décision est motivée par les caractéristiques du canal, le type de données et le comportement des utilisateurs licenciés.

3) *Le partage du canal* : L'idée de partage du canal répond à l'exigence de synchronisation des accès aux portions libres détectées entre les utilisateurs secondaires<sup>1</sup> d'une part, et entre les utilisateurs secondaires et les utilisateurs primaires<sup>2</sup> d'autre part.

4) *La mobilité du patient* : La mobilité au niveau du spectre traduit le fait que chaque couple émetteur-récepteur (équipement du patient et nœud de traitement distant dans le contexte actuel) doit être capable de changer de fréquence si la portion de bande initiale est occupée ou n'offre plus la qualité de service désirée par les applications de suivi du patient. De plus, le déplacement de l'utilisateur (ici le patient) qui déclenche le hand-over est traité en conformité avec les fréquences libres disponibles.

### C. Les exigences liées au suivi de patient et intérêt de la radio cognitive

La collecte par les capteurs et le traitement automatisé suivi d'une transmission des données médicales et des informations pertinentes appelant à une célérité des soins au patient constituent tout un ensemble de services interdépendants axés sur la communication. L'urgence des transmissions de données médicales et la nécessité de disposer d'une architecture de communication robuste réduisant, voir annihilant les éventuelles ruptures de liaison justifient l'appel à la technologie radio cognitive. La radio cognitive utilisée dans ce contexte devra garantir une connectivité en tout temps, en tout lieu.

## III. LA RADIO COGNITIVE DANS LE CONTEXTE DU SUIVI DE PATIENT

L'utilisation de la radio cognitive par les applications médicales de suivi de patient est de plus en plus envisagée dans la littérature. Un exemple de système de communication sans fil basé sur la radio cognitive, déployé dans un contexte hospitalier est décrit dans [5]. Cette idée répond non seulement au besoin de gestion des interférences causées par les équipements sans fil sur les différents appareils électroniques médicaux, mais aussi à l'exigence de priorisation des accès sur le canal de communication sans fil pour les diverses applications de transmission des données médicales. La priorité est attribuée selon le critère d'urgence; la transmission d'une alerte ou d'une crise par exemple primant sur la transmission d'une simple

<sup>1</sup>Ce sont des utilisateurs radio cognitive, en réalité qui ne possèdent aucune licence pour occuper la portion de bande libre à l'image du patient dans cette étude.

<sup>2</sup>Ce sont les utilisateurs qui ont une priorité d'occupation de la bande car disposant d'une licence.

information sur le patient. Dans [6], les performances de l'utilisation des réseaux radio cognitive comme support de communication pour les applications de télémédecine sont étudiées. La flexibilité offerte par la radio cognitive constitue le point focal de cette analyse. A la différence des solutions actuelles sans fil de transfert de données médicales, basées exclusivement sur l'utilisation de bandes de fréquences libres, cette approche basée sur la radio cognitive propose une exploitation opportuniste élargie aux bandes de fréquences licenciées pour une meilleure qualité de service. La proposition en [7] démontre la capacité de la radio cognitive à améliorer les performances pour les réseaux corporels sans fil (WBAN : Wireless Body Area Network). Dans un WBAN, le signal subit un impact important lié à l'implantation des capteurs médicaux dans le corps humain, et à l'environnement immédiat. La problématique liée à la détection du signal de communication, beaucoup atténué et certainement affaibli, trouve ainsi une réponse grâce à l'efficacité du sondage et la détection des ondes électromagnétiques rendu possible par la radio cognitive. Une autre approche [8] propose un mécanisme de sondage conduisant à une détection concurrente du signal de communication et des fonctions vitales. Une architecture rendant possible le sondage spectral et mesurant le rythme respiratoire et les battements de cœur est suggérée. Cette approche énonce la possible réalisation du suivi de patient à travers l'architecture novatrice radio cognitive proposée. Cette architecture supporte la transmission des données collectées vers le centre de traitement par exploration intelligente du spectre fréquentiel. Des différentes propositions de la littérature et des propriétés de la technologie radio cognitive découle l'évidence d'une haute disponibilité des canaux, indispensable à la réalisation des communications. Un service aux patients de qualité assurant une connectivité permanente s'appuyant sur les réseaux radio cognitive passe nécessairement par une quintessence du sondage des canaux, pour une détection efficiente et à moindre coût des fréquences libres.

#### IV. LE SCÉNARIO DU SUIVI DE PATIENT

##### A. Schéma descriptif

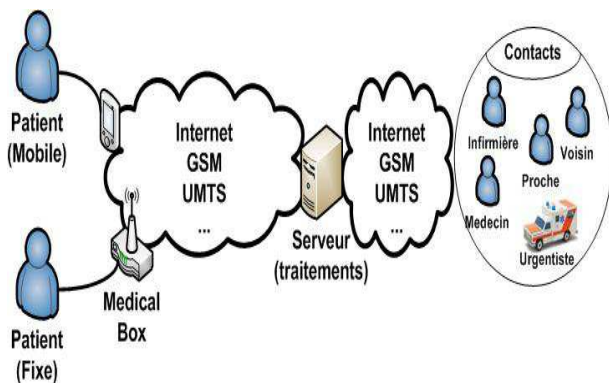


Fig. 2. Architecture de communication

Le suivi des signes vitaux du patient, qu'il soit en mobilité, dans un centre hospitalier ou à domicile engendre une collecte de données par les capteurs, un traitement minimal au niveau du nœud local intelligent (fixe : Medical Box ou mobile : Smartphone, PDA, etc.) et génère un ensemble de transmissions allant des alertes aux mises à jour comme indiqué à la figure 2. Le caractère sensible de ces informations justifie l'utilisation d'équipements radio cognitive (le nœud intelligent), capable de surmonter le défi de connectivité. En effet, un équipement radio cognitive capitalise et exploite au besoin différentes interfaces de communication (WIFI, Bluetooth, GSM etc.). Selon le besoin de l'application médicale, l'urgence de la communication, la disponibilité fréquentielle, la radio cognitive choisit l'interface et donc la technologie adéquate pour assurer les transmissions. La figure 2 montre également la nécessité de disposer de canaux de communication de manière permanente pour ces alertes liées à l'état de santé ainsi que la récupération, la mise à jour des informations importantes liées au patient. Ces informations constituent ce qu'on appelle le profil du patient sur lequel est basé le principe de suivi. Pour assurer une connectivité permanente entre le patient suivi dans son environnement (fixe ou mobile) et les acteurs extérieurs (les intervenants médicaux, les applications médicales, les serveurs de stockage/traitement, etc.), nous pouvons faire appel au dispositif de sondage de la radio cognitive, adapté pour explorer les différentes technologies et donc interfaces disponibles sur les équipements et offrir la bande fréquentielle idéale et à moindre coût. A cet effet, le protocole de communication proposé dans [5], basé sur une architecture centralisée où un nœud radio cognitive serveur est chargé de la gestion de toutes les transmissions (utilisateurs primaires et utilisateurs secondaires) par un mécanisme de file d'attente des paquets apporte une réponse partielle. Les auteurs de cette solution, bien que novatrice se concentrent sur la synchronisation des accès à un seul canal de transmission de données, à l'exploration d'une même technologie et se limite à un environnement hospitalier. Une adaptation de cette idée à notre contexte de suivi de patient en tout lieu exige l'extension des fonctions afin d'apporter une réponse "anywhere" avec une capacitation multicanaux et multitechnologies. En effet, en plus d'une solution distribuée, l'idée que nous proposons offre la possibilité d'explorer toutes technologies disponibles et de transmettre sur des canaux divers. Notre proposition présente ainsi l'avantage d'une prise en compte non seulement des contraintes traitées dans [5] relatives à un contexte hospitalier qui s'avère statique, mais adapte également la réponse au contexte de mobilité du patient à travers un mécanisme de prédiction spectrale qui facilite l'accès à un canal de communication en tout lieu. Le socle d'une telle proposition repose sur un sondage plus efficient détectant les trous de spectre, allouant la technologie, et par conséquent le canal le mieux approprié à la demande de communication inhérente. Cela confère la possibilité

d'une optimisation de l'utilisation des technologies(WIFI, Bluetooth, Zigbee, etc.) et des canaux disponibles tout en tirant profit du multi-interfaces de communication offert par les équipements.

### B. Problématique liée au sondage de spectre

Le sondage spectral pour la détection de bandes libres constitue l'opération la plus coûteuse en termes de temps de traitement et de consommation énergétique pour un équipement radio mobile. L'autonomie en énergie à maximiser pour tout équipement médical mobile ne saurait tolérer un perpétuel sondage, qui apparaîtrait inefficace et surtout inopportun. Un mécanisme de prédiction du spectre mesurant les probabilités des états des canaux(libre ou occupé) permettrait de réduire considérablement la fréquence des sondages et assurerait un choix raisonné du canal à sonder. Toutefois, les solutions de prédictions actuelles présentent des faiblesses.

### C. Les limites des algorithmes de prédiction existants

La littérature actuelle s'est assez concentrée sur la recherche de solutions de prédiction du handover [9][10], laissant peu explorée, la prédiction spectrale en environnement mobile. Des études sur la prédiction spectrale utilisant des approches telles que la théorie des jeux et l'apprentissage artificiel [11][12] sont aussi proposées mais dans un cadre statique. Ce qui pose la problématique de mobilité ou du handover associé à une prédiction de la disponibilité spectrale dans la nouvelle cellule. Les techniques d'apprentissage artificiel telles que le modèle de Markov caché et les réseaux de neurones se révèlent particulièrement bien adaptées pour la prédiction du spectre mais reste encore limitées par leur utilisation dans un cadre assez statique où il n'y a pas de changement de cellule. De plus, le handover déclenche une nouvelle période d'entraînement pour les algorithmes d'apprentissage, ce qui engendre un délai de latence non négligeable pour la connectivité. D'autres modèles standards de prédiction moins envisagés dans les réseaux radio cognitive utilisant les techniques statistiques [13][14] telles que AR (Auto Regressive), MA (Moving Average), ARMA (Auto Regressive Moving Average), ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) sont aussi explorées. Ces modèles exigent la mise à disposition de données complètes et assez représentatives.

Les études dont le but serait de réduire l'impact des changements de bandes de fréquences sur la connectivité pour les communications radio cognitive, par construction de modèles de prédiction ou d'anticipation, permettront de garantir des transmissions permanentes exigées par le processus de suivi de patient en temps réel.

## V. SOLUTION PROPOSÉE

La solution proposée consiste à ajouter une fonction de prédiction au module de sondage spectral illustré par la figure 1.

Cette fonction associe les techniques d'apprentissage au système *Grey Model*(voir section B) pour évaluer la probabilité d'occupation des canaux et ainsi guider la décision relative au choix du canal à sonder. Cela permettra de dissimuler le temps dévolu aux séquences d'entraînement et de minimiser les coûts computationnels. L'évaluation préalable d'une part de la disponibilité du spectre dans la future zone en situation de mobilité du patient et d'autre part des bandes libres d'une même zone afin d'anticiper les changements de canaux constituent les problématiques à résoudre. Nous illustrons la réponse apportée à ces questions à travers la figure 3, qui fait une description du fonctionnement de la fonction de prédiction.

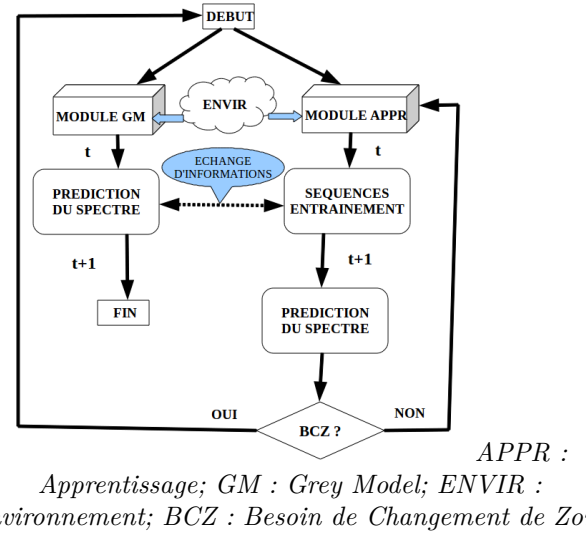


Fig. 3. Fonctionnement du processus de prédiction

### A. La phase du sondage

Sachant que la durée du sondage est estimée à  $\lambda$ , le temps d'établissement d'une connexion égal à  $\gamma$ , alors le temps de passage d'une bande à l'autre sera de  $\lambda + \gamma$ . Notons que le passage d'un canal à l'autre pourrait se faire suite à l'arrivée d'un utilisateur prioritaire, à la dégradation de la qualité de service sur la bande d'origine ou encore être consécutif à la mobilité spectre-patient. Le temps de changement de bande de fréquence et par conséquent le coût du sondage apparaît non négligeable [15]. La maîtrise de ce délai grâce à l'ajout d'une fonction de prédiction permettrait de réduire le temps de latence par une anticipation des opérations de sondage. Aussi, on pourrait se passer des solutions actuelles qui consistent à faire du sondage multiple afin de constituer une base de données relative aux canaux libres à utiliser. Notre solution de prédiction à le mérite de limiter le nombre de sondage, et surtout de faire du sondage au moment opportun, ce dernier étant à chaque fois évalué par anticipation.

### B. Description du processus de prédiction

La théorie du Grey Model [16], est connue pour l'analyse des problèmes à informations incomplètes ou incertaines.



Elle présente comme principal avantage sur les techniques statistiques de prédiction standards telles que AR, MA, ARMA, ARIMA, l'aptitude à se satisfaire d'une quantité minimale de données d'entrée pour réaliser ses prédictions. Les systèmes de prédiction basés sur le Grey Model s'appliquent à de nombreux domaines dont la météorologie avec la prédiction de la température [17], les finances [18], les réseaux de télécommunication [19], les activités militaires [20], les analyses médicales [21], etc. Notre solution s'appuie sur cette capacité à prédire, sur la base de données incomplètes souvent peu significatives, offerte par le Grey Model et le faible coût de traitement des algorithmes d'apprentissage une fois bien entraîné. En effet, le nœud intelligent du patient exploite le module d'*Apprentissage (APPR)* et le module *Grey Model (GM)* dans une nouvelle zone ou au début de son activité. Le Grey Model servant à ce stade à la prédiction spectrale pendant que le module apprentissage exécute les séquences d'entraînement à partir des données de l'environnement et éventuellement des résultats du Grey Model. La fonction de prédiction revenant au moteur d'apprentissage, une fois son efficacité prouvée par la pertinence de ses résultats et qu'aucun besoin de changement de zone (BCZ) n'est éprouvé tel que définit par la figure 3. L'échange d'informations entre le module GM et le module APPR permet d'enrichir d'une part l'échantillon d'apprentissage par les résultats prédits au niveau du module GM et d'autre part, d'informer ce dernier que la phase d'entraînement est terminée et que la prédiction revient au module APPR tel que décrit par le processus de prédiction (figure 3).

### C. Les données de base du modèle

Nous nous sommes particulièrement intéressés au canal WIFI composé de quatorze sous canaux dans le cadre de nos expérimentations. Ce choix est justifié par les caractéristiques de la plate-forme GNU-Radio exploitant la bande WIFI 2.4 GHz, dont nous disposons sans toutefois ignorer que le principe reste similaire pour les autres types de canaux. En outre, concernant la bande cible, le spectre fait l'objet d'une partition en sous bandes égales comme indiqué à la figure 4. Chaque sous bande peut être soumise à un sondage périodique et selon le besoin. Notre objectif étant de réaliser une distribution de probabilité de l'état du canal (libre ou occupé) sur les futures périodes, amène à fonder notre raisonnement sur les paramètres suivants :

1) *L'énergie détectée sur chaque sous bande*: Il est prouvé [22] que l'énergie détectée sur un canal permet d'identifier un signal. Une comparaison de l'énergie reçue par l'équipement radio à un seuil prédéfini selon le type du canal, permet de trancher sur la présence ou non d'un signal et donc d'un utilisateur (primaire) telle qu'illustré à la figure 5. Le principe étant basé sur deux hypothèses que nous nommons  $H_0$  pour canal libre(OFF) et  $H_1$  pour canal occupé(ON) tel que:

$$H_0 : y(t) = n(t)$$

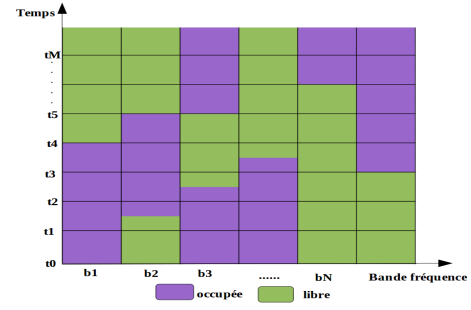


Fig. 4. Caractérisation du spectre pour le modèle

$$H1 : y(t) = x(t) + n(t)$$

Où  $t = 1, 2, \dots, N$  représente les échantillons de signaux reçus;  $y(t)$  le signal reçu par l'équipement radio de communication;  $n(t)$  le bruit gaussien et  $x(t)$  le signal de détection de présence.

2) *Les données statiques issues de l'environnement radio*: Les données statiques restent déchiffrables et très peu évolutives avec le temps. Il s'agit ici du nombre de canaux d'une bande donnée, le type de bande, la localité et le type de la zone (fortement urbaine, rurale, etc.), la fréquence centrale de chaque canal, le seuil énergétique de chaque canal, etc.

3) *Les données dynamiques issues de l'environnement radio*: Les données dynamiques, beaucoup plus aléatoires et évolutives comprennent, l'énergie sur chaque canal, la puissance d'émission sur chaque canal, le nombre d'utilisateurs primaires dans une zone, le nombre de canaux libres à un instant donné, etc.

Les données à maîtriser ici sont celles qui sont dynamiques. L'énergie sur un canal paraît de loin le facteur le plus important influençant l'ensemble des données. Son estimation et sa corrélation avec les autres informations, une évaluation avec le seuil énergétique représenté par  $\mu$  sur la figure 5 par l'énergie observée sur chaque canal permettrait d'affirmer l'état libre ou occupé d'un canal. Cette probabilité guide ainsi la décision et le choix du canal à sonder. Les sondages des canaux WIFI que nous avons réalisés grâce à la plate-forme GNU-Radio montrent aussi l'importance de certaines informations environnementales dans la prise de décision. En effet, certaines sous bandes paraissent encombrées pendant que d'autres sont libres. L'état d'une sous bande change en fonction du jour et de l'heure, de la zone géographique pour la même bande de fréquences (WIFI).

### D. Distribution de l'énergie sur chaque canal pour une période donnée

L'équipement radio cognitive du patient étant capable de mesurer l'énergie sur un canal à chaque instant, notre solution consiste en une distribution de cette donnée et sa probabilité sur les futures périodes. Cela consiste en une série de mesures (base de connaissances) à l'instant  $t$ , permettant de faire l'ajustement nécessaire de la prédiction

réalisée en  $t-1$  et cette correction d'erreur permettant de faire une meilleure prédiction de l'instant  $t+1$  par apprentissage. Cette évaluation/prédiction aidant à l'estimation de la probabilité d'occupation du canal au temps  $t+k$ , et d'anticiper non seulement le choix du canal en  $k$  à sonder et par conséquent les opérations de sondage et de saut de canal dès le temps  $t+j$ ,  $j < k$  ; avec  $j = k - (\lambda + \gamma)$ . La figure 5 montre la relation entre le signal reçu par le

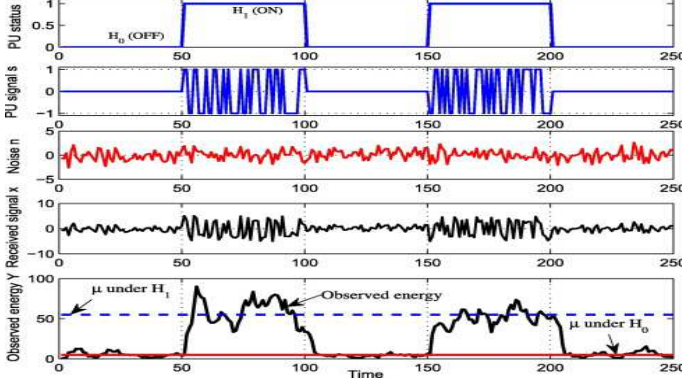


Fig. 5. Utilisation du spectre

canal, l'énergie qui en découle ainsi que l'interprétation de la mesure obtenue par une distinction entre signaux des utilisateurs primaires et le bruit gaussien. Le niveau d'énergie ou la puissance du signal déterminant la présence ( $H_1$  ON) ou l'absence ( $H_0$  OFF) d'un utilisateur primaire. Les mesures d'énergies sur les sous canaux de la bande WIFI réalisées par l'équipement (nœud intelligent) radio cognitive du patient en temps réel fournissent des données discrètes nécessitant un traitement spécifique afin d'obtenir des informations plus exploitables. Les mesures avec la plate-forme GNU-Radio démontrent, en effet la nécessité d'appliquer des algorithmes tel que la transformée de Fourier rapide afin d'harmoniser ces données avec le domaine fréquentiel. Ces données mesurées en temps réel une fois traitées serviront à alimenter le module GM pour servir de valeurs réelles d'échantillon. Le Grey Model se satisfaisant de très peu de données INPUT pour réaliser ses prédictions, les premières mesures qui alimentent ce module permettent d'une part de passer immédiatement aux prédictions (gain en temps et continuité de prédiction, par dissimulation du temps d'entraînement) et d'autre part de construire la base de connaissance du module d'apprentissage (APPR) qui a besoin d'échantillons assez représentatifs qui ne sont autres que les résultats des prédictions du Grey Model.

#### E. Détail des modules apprentissage (APPR) et Grey Model (GM)

Pour les besoins de simulation du modèle, nous avons opté pour les chaînes de Markov comme technique d'apprentissage associée au GM (1,1). Le choix du modèle Markovien est motivé par sa capacité de circonscription des erreurs relatives aux prédictions. Dans cette solution,

la maîtrise des erreurs constitue la variable complexe conditionnant la précision des valeurs prédites. La technique de correction d'erreur est basée sur l'observation d'une courbe de tendance, et seules les valeurs les plus récentes décrivant la tendance de la série sont pertinentes pour prédire les valeurs futures. En effet, pour un ensemble de données d'échantillonnage  $X(1), X(2), X(3), \dots, X(N)$ , une fonction d'ajustement appliquée aux valeurs permet d'évaluer les tendances futures en assignant un poids aux valeurs précédentes. La fonction d'ajustement en  $k$  sur un ensemble de donnée  $X(N)$  par exemple donne :

$Xhat(k) = p_1x_k + p_2x_{k-1} + p_3x_{k-2} + \dots + p_nx_{k-n+1}$ , avec  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , les poids assignés aux données, les valeurs les plus récentes bénéficiant des poids les plus élevés comme suit:

$Xhat(t) = \alpha * [x_{t-1} + (1 - \alpha)x_{t-2} + (1 - \alpha)^2x_{t-3} + (1 - \alpha)^3x_{t-4} + \dots] + (1 - \alpha)^{t-1}x_1$  avec  $\alpha$  le coefficient d'ajustement et  $(1, (1 - \alpha), (1 - \alpha)^2, (1 - \alpha)^3, (1 - \alpha)^4 \dots$  les poids respectifs des différentes valeurs.

La valeur de  $\alpha$  constituant le facteur essentiel à maîtriser est ainsi modélisée par les chaînes de Markov, constituées d'un ensemble d'états et de transitions. Les valeurs de  $\alpha$ , sont réparties sur l'intervalle  $\phi[0; 1]$  subdivisée en un ensemble de sous-intervalles égaux où chaque sous-intervalle représente un état possible du modèle de Markov. A partir de la distribution initiale des différentes valeurs de  $\alpha$  dans le temps sur les différents états/intervalles et les différentes transitions observées d'un état à l'autre, on calcule les probabilités de transitions futures de  $\alpha$ . Ainsi, la probabilité de transition d'un état  $i$  à l'état  $j$ , notée  $P_{ij}$  est évaluée comme suit:

$P_{ij} = Q_{ij}/Q_i$ , avec  $Q_i$  représentant le nombre de fois que  $\alpha$  reste dans l'état/intervalle  $i$ , et  $P_{ij}$ , le nombre d'occurrence de transitions entre l'état/intervalle  $i$  et l'état/intervalle  $j$ . Ainsi avec cinq états différents, choix fait par l'algorithme en fonction des variations de  $\alpha$ , les valeurs possibles de  $P_{ij}$  forment la matrice de transition  $M$  suivante:

$$M = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} \end{pmatrix}$$

A la distribution initiale est associée un vecteur initial  $\pi^{(0)} = [\pi_1^{(0)} \pi_2^{(0)} \pi_3^{(0)} \pi_4^{(0)} \pi_5^{(0)}]$ , constituant les probabilités possible de transition entre les états. Le calcul de la distribution des états futurs possibles de transition( $t+1$ ) à partir de  $\pi^{(0)}$  est obtenue par :

$$\pi^{(t+1)} = \pi^{(0)} M^{(i)}$$

#### F. Choix du Grey Model (GM)

Le GM(1,1) reste le plus appliqué dans les systèmes de prédiction [23]. D'autres modèles tel que le GM(1,N), Grey Model à plusieurs variables existent mais nous utiliserons dans le cadre de cette étude le GM(1,1) largement suffisant pour la prédiction de l'énergie du canal singularisé par une seule variable.

## Procédure de modélisation du GM(1,1)

- Le système prend en entrée une séquence de valeurs, correspondant à l'énergie mesurée par l'équipement radio de l'utilisateur/patient sur chaque sous-canal  $x$ ,  $X$  décrivant l'ensemble des sous canaux ( $b_1, b_2, \dots, b_N$ ), avec  $X^0 = [x^0(1), x^0(2), x^0(3), \dots, x^0(n)]$ , la séquence initiale où  $x^0(t)$  correspond à la sortie du système à l'instant  $t$ .
- A partir de la séquence initiale définie plus haut, le système génère une nouvelle séquence  $X^1$  avec comme nouvelle valeur  $X^1 = [x^1(1), x^1(2), x^1(3), \dots, x^1(n)]$ , où  $x^1(t) = \sum_{m=1}^{t-1} x^0(m)$ .
- L'équation différentielle du premier ordre obtenue à partir de  $X^1$  est donnée par :  $\frac{dx^1(t)}{dt} + ax^1(t) = b$ ,  $a$  étant le coefficient qui reflète la tendance prédictive et  $b$  le coefficient de contrôle exprimant la partie d'information connue ainsi que la partie de l'information non connue du modèle.
- Les estimations des paramètres ou les coefficients de la matrice  $[a, b]^T$  peuvent être obtenues par la méthode des moindres carrés sachant que  $[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T y_N$ , où
$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^1(1) + x^1(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^1(2) + x^1(3)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^1(3) + x^1(4)) & 1 \\ \dots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^1(n-1) + x^1(n)) & 1 \end{bmatrix}$$
et  $y_N = [x^0(2), x^0(3), x^0(4), \dots, x^0(n)]^T$ .  $n$  étant la taille de la séquence définie par le modèle.
- La fonction de prédiction devient donc :  $\hat{x}^1(t) = (x^1(1) - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a}$
- Et la valeur prédite au temps  $t+1$  pour chaque sous bande est obtenue par :  $\hat{x}^0(t+1) = \hat{x}^1(t+1) - \hat{x}^1(t)$ .

## VI. EXPÉRIMENTATION

Notre étude est d'une part basée sur une observation/analyse réelle du spectre à travers la plate-forme radio cognitive et d'autre part sur des résultats de simulation.

### A. La plate-forme radio cognitive

Nous avons mis en place une plateforme radio cognitive fonctionnelle utilisant la GNU-Radio et la radio universelle USRP1 d'Ettus<sup>3</sup>. Au boîtier USRP1, est associé deux antennes externes omnidirectionnelles de type RFX2400 et RFX900, un ordinateur intel pentium avec un processeur de 1 GHz et 20 GB de disque utilisant linux ubuntu 10.04. L'idée et l'objectif à terme étant d'émettre et de recevoir grâce à cette plate-forme, quasiment tout standard radio (AM, FM, DAB, GSM, Wifi, GPS, TV, etc.) mais aussi

de procéder à l'analyse du spectre, des signaux médicaux etc.

### B. Les données et les valeurs des prédictions du modèle

Les résultats actuels obtenus découlent exclusivement de l'algorithme d'apprentissage. L'implémentation et la simulation de la fonction de prédiction par Grey Model forment l'objectif de notre future contribution. Toutefois, les résultats décrits dans [24], concernent une étude comparative du Grey Model et un modèle de prédiction connu sous le nom de "Fuzzy Predictive Model" basé sur l'apprentissage, appliqué au domaine météorologique. Cette étude démontre la capacité du Grey Model à réaliser des prédictions sans aucun entraînement préalable. Le tableau (figure 8) et les résultats des prédictions (figure 9) montrent l'écart de temps et la grande quantité de données d'échantillonnage consacrés à l'entraînement (train + test) pour un algorithme d'apprentissage et le gain réalisé à terme en utilisant le Grey Model dont les prédictions restent instantanées. Les résultats des simulations [24] viennent renforcer notre proposition, qui repose sur une compensation des prédictions par le Grey Model durant la phase d'entraînement de la fonction "apprentissage". Ainsi, se substitue aux valeurs de prédiction du Grey Model envisagées à terme comme base de connaissance pour la fonction d'apprentissage de notre modèle, les valeurs réelles mesurées alimentant l'échantillon d'apprentissage. Ces valeurs sont mesurées en temps réel par l'équipement radio cognitive, nœud intelligent du patient correspondant aux données d'échantillonnage  $X$ . Se fondant sur ces mesures, des ajustements sont réalisés par la fonction d'apprentissage afin d'une prise en compte des erreurs pour les futures prédictions. L'algorithme, sur la base des observations/mesures obtenues, discerne de l'échantillon, les composantes périodiques qui apparaissent stationnaires ou cyclo-stationnaires, les composantes irrégulières qui ne reflètent aucune saisonnalité. De ces composantes se décline une tendance qui permet alors de réaliser les prédictions grâce à la fonction d'ajustement. Au minimum, deux périodes sont nécessaires pour faire fonctionner l'algorithme et le nombre de valeurs mesurées pour chaque période varie en fonction du temps, des critères de pertinence des valeurs, le degré de précision des prédictions. En effet, les prédictions étant réalisées en prélude au sondage, la valeur effectivement sondée permet d'apprécier la précision de la fonction de prédiction. Ainsi, la taille de la base de connaissance devient fonction de l'effectivité du processus d'apprentissage. Un poids fort est affecté aux valeurs récentes résultantes du sondage après prédiction qui déterminent les tendances et un poids faible voir la suppression des valeurs les plus anciennes de la base. Les valeurs ( $X$ ) suivantes générées dans le cadre de notre étude constituent notre échantillon d'apprentissage. Ces données représentent l'énergie mesurée sur un sous canal à différentes périodes données. Ces opérations de mesure

<sup>3</sup><http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>



et d'apprentissage, s'appliquent à chaque sous canal disponible.

> X

48	70	50	40	90	46	72	48	39	91	49
71	49	37	88	45	70	51	38	95	47	75
50	36	93	42	76	60	40	98	41	77	55
39	97	42	73	50	38	99	41	76	53	37

A partir de ces échantillons X, on obtient des résultats de prédiction par apprentissage que nous représentons par les courbes de tendance des figures 6, 7 et 8.

### C. Résultats

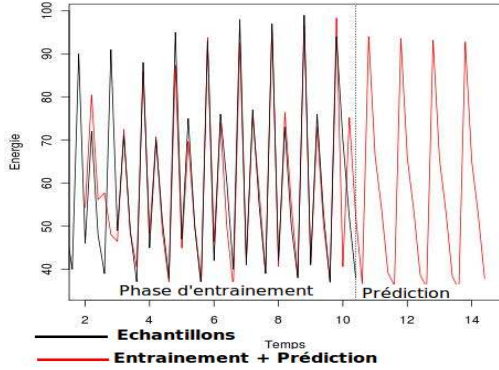


Fig. 6. Résultats des prédictions sur les 44 valeurs

La figure 6 montre qu'avec un échantillon d'apprentissage satisfaisant, l'algorithme est capable de maîtriser les événements à caractère périodique tels que les instants de forte activité des utilisateurs primaires ainsi que leurs moments de faible présence exploitables par le nœud radio cognitive du patient pour un canal donné. Ce comportement stationnaire des utilisateurs primaires aide à l'obtention de meilleurs résultats de prédictions pour les périodes futures.

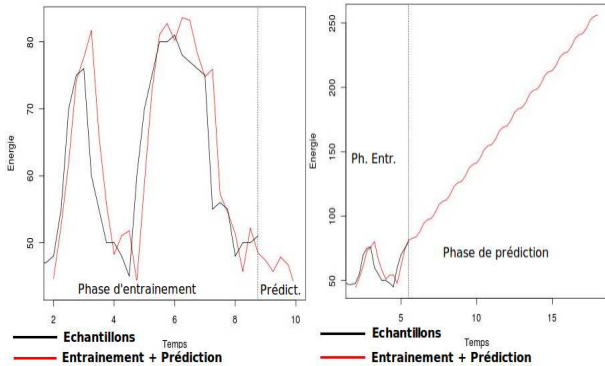


Fig. 7. Résultats des prédictions respectives sur 25 et 10 valeurs

La figure 7 démontre que le comportement des utilisateurs primaires peut s'avérer aléatoire et non-stationnaire et nécessiter plus de temps d'entraînement, de données d'échantillons. Dans ce cas, l'objectivité des prédictions

PREDICTION COMPARISON						
Predictor	Fuzzy (WM)			Grey		
Inputs	T(k-1)	T(k-2)	T(k-7)	T(k-1)	T(k-2)	T(k-7)
Mfs	9	7	5	-	-	-
Output	T(k)			T(k)		
Mfs	15					
AND Method	Product					
Implication	Product					
Aggregation	Sum					
Defuzzifier	Centroid					
Rules	138					
Results	Train		Test	Local Prediction		
Computation Time	32.366 sec		2.063 sec	0.471 sec		
AME	1.385728		1.447687	1.407747		
MSE	3.066376		3.375785	3.524036		
$\rho$	0.971563		0.972925	0.970235		
Maximum Error (absolute)	8.736815		8.198800	9.056811		

Fig. 8. Tableau comparatif des résultats de prédiction [24]

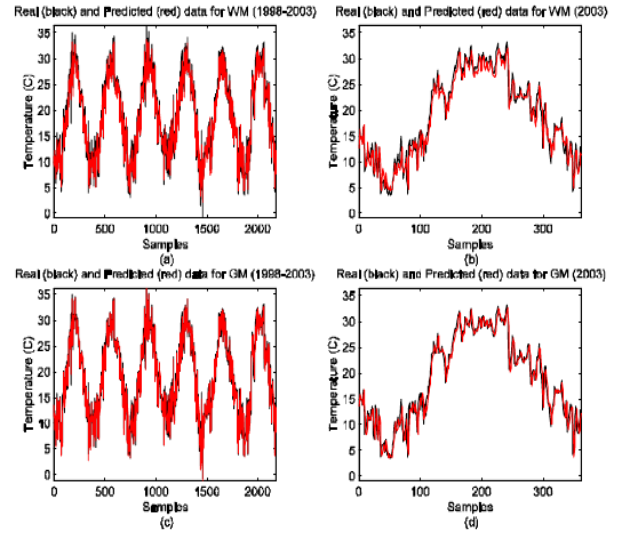


Fig. 9. Résultats des prédictions avec GM(1,1) [24]

se limite à la valeur  $t+1$  prédite au temps  $t$ . La distribution des valeurs prédites sur les périodes futures (supérieures à  $t+1$ ) devenant de moins en moins pertinente. Ces résultats révèlent l'importance du module Grey Model comme solution alternative de prédiction couvrant la période d'entraînement du module APPR. Cela est bien justifié par les résultats du tableau comparatif (figure 8) et de la figure 9 où la courbe en rouge représentant les valeurs de la prédiction par Grey Model débute au même instant que la courbe en noir caractérisant les valeurs réelles. Ces résultats, bien qu'apportant un début de validation du comportement de la solution globale dans un environnement peu perturbant, restent à confirmer dans le cadre d'un milieu caractérisé par des perturbations électromagnétiques importantes.

## VII. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La construction de dispositifs de traitements médicaux, assignant une forte implication des technologies de communication et l'affluence des équipements de nouvelle génération (smartphone, PDA, etc.), alimentent l'ambition

d'une perpétuelle connectivité réseau indispensable dans le contexte de suivi de patient en mobilité. Le problème de suivi permanent et en temps réel des signes vitaux en tout lieu, appelle au développement des technologies ambitieuses capables de pallier à tout défaut de connexion à l'image des mécanismes proposés par la technologie radio cognitive. Toutefois, la montée en puissance ces dernières années de cette technologie ne saurait tolérer l'ignorance des problématiques existantes. Dans ce papier, nous avons d'abord procédé à une présentation du concept de réseaux radio cognitive, vu comme une solution pour assurer une connectivité permanente dans le cadre du suivi de patient. Ensuite, nous avons proposé un module, dont l'implémentation permettrait d'améliorer le processus de détection de canaux de communication libres pour les réseaux radio cognitive, crucial pour la transmission permanente des données médicales. Le modèle de prédiction spectrale que nous proposons associe la technique du Grey Model aux technologies de l'apprentissage artificiel pour garantir un changement de canal sans défaut de connectivité, avec un algorithme à faible coût de traitement. L'originalité du modèle réside dans l'utilisation de la technologie du Grey Model pour la prédiction spectrale associée à un apprentissage basé sur la puissance énergétique du canal, contrairement aux solutions existantes qui reposent sur les statistiques d'utilisation des sous-canaux. Enfin, nous avons réalisé des simulations basées sur l'apprentissage artificiel permettant d'évaluer ce prototype. Nos futurs travaux, nous permettront de développer le module Grey Model afin d'avoir des mesures de performances réelles.

## REFERENCES

- [1] I. Mitola, J., "Cognitive infosec," in *Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International*, vol. 2, june 2003, pp. 1051 – 1054 vol.2.
- [2] K. R. C. Ian F. Akyildiz\*, Won-Yeol Lee, "Crahn's: Cognitive radio ad hoc networks," *elsevier*, 2009.
- [3] "Jacques palicot. "cognitive radio: An enabling technology for the green radio communications concept", " *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*.
- [4] E. Trigui, M. Esseghir, and L. M. Boulahia, "Gestion dynamique du spectre entre terminaux radio cognitive mobiles," in *"CFIP 2011"- Colloque Francophone sur l'ingénierie des protocoles(2011)*, Avril. 2011, pp. 1 –19.
- [5] P. Phunchongharn, E. Hossain, D. Niyato, and S. Camorlinga, "A cognitive radio system for e-health applications in a hospital environment," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 17, no. 1, pp. 20 –28, february 2010.
- [6] S. Feng, Z. Liang, and D. Zhao, "Providing telemedicine services in an infrastructure-based cognitive radio network," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 17, no. 1, pp. 96 –103, february 2010.
- [7] F. Jingling, L. Wei, and L. Yang, "Performance enhancement of wireless body area network system combined with cognitive radio," in *Communications and Mobile Computing (CMC), 2010 International Conference on*, vol. 3, april 2010, pp. 313 –317.
- [8] F.-K. Wang, C.-J. Li, C.-H. Hsiao, T.-S. Horng, J. Lin, K.-C. Peng, J.-K. Jau, J.-Y. Li, and C.-C. Chen, "An injection-locked detector for concurrent spectrum and vital sign sensing," in *Microwave Symposium Digest (MTT), 2010 IEEE MTT-S International*, may 2010, pp. 768 –771.
- [9] I. Butun, A. Cagatay Talay, D. Turgay Altılar, M. Khalid, and R. Sankar, "Impact of mobility prediction on the performance of cognitive radio networks," in *Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2010*, april 2010, pp. 1 –5.
- [10] Q. Guan, F. Yu, S. Jiang, and G. Wei, "Prediction-based topology control and routing in cognitive radio mobile ad hoc networks," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 9, pp. 4443 –4452, nov. 2010.
- [11] Y. Liu, B. Tamma, B. Manoj, and R. Rao, "On cognitive network channel selection and the impact on transport layer performance," in *GLOBECOM 2010, 2010 IEEE Global Telecommunications Conference*, dec. 2010, pp. 1 –5.
- [12] Y. Li, Y. ning Dong, H. Zhang, H. tao Zhao, H. xian Shi, and X. xing Zhao, "Spectrum usage prediction based on high-order markov model for cognitive radio networks," in *Computer and Information Technology (CIT), 2010 IEEE 10th International Conference on*, 29 2010-july 1 2010, pp. 2784 –2788.
- [13] Z. Hua and R. Ruo-en, "High-frequency time series prediction based on wavelet transform and arma model," in *Management and Service Science, 2009. MASS '09. International Conference on*, sept. 2009, pp. 1 –4.
- [14] X. Ye, "The application of arima model in chinese mobile user prediction," in *Granular Computing (GrC), 2010 IEEE International Conference on*, aug. 2010, pp. 586 –591.
- [15] Y. Liu, R. Yu, and S. Xie, "Optimal cooperative sensing scheme under time-varying channel for cognitive radio networks," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2008. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symposium on*, oct. 2008, pp. 1 –6.
- [16] D. Julog, "The basis of grey theory," huazhong University of Science and Technology Press, In Chinese, 2002.
- [17] Y.-P. Huang and T.-M. Yu, "The hybrid grey-based models for temperature prediction," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 2, pp. 284 –292, apr 1997.
- [18] T.-N. Chou, "A novel prediction model for credit card risk management," in *Innovative Computing, Information and Control, 2007. ICICIC '07. Second International Conference on*, sept. 2007, p. 211.
- [19] W. Jiechao and Z. Yidan, "Peers' attribute data prediction in a p2p network based on the grey prediction model and its improvements," in *Information Networking and Automation (ICINA), 2010 International Conference on*, vol. 2, oct. 2010, pp. V2–15 –V2–19.
- [20] J. Yu, L. Zhi, Y. Qiu, L. Jin, and H. Du, "Grey synthetical prediction model of military logistics based on evolutionary neural network," in *Computational Sciences and Optimization, 2009. CSO 2009. International Joint Conference on*, vol. 1, april 2009, pp. 663 –665.
- [21] K.-T. Hsu, T.-M. Yan, and P.-W. Liu, "A study on the annualized medical expense prediction model of the bureau of national healthy insurance—the application of the grey prediction theory," in *Systems, Man and Cybernetics, 2006. SMC '06. IEEE International Conference on*, vol. 1, oct. 2006, pp. 764 –769.
- [22] Z. Ling-ling, H. Jian-guo, and T. Cheng-kai, "Novel energy detection scheme in cognitive radio," in *Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2011 IEEE International Conference on*, sept. 2011, pp. 1 –4.
- [23] C. Sheng, Y. Lin, Z. Gengwu, Z. Cheng, D. Shijun, and D. Chao, "Short-term wind power prediction based on combined grey-markov model," in *Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on*, vol. 3, oct. 2011, pp. 1705 –1711.
- [24] A. I. Dounis, D. Tseles, G. Nikolaou, and G. P. Syrcos, "A comparison of grey model and fuzzy predictive model for times series," in *International Journal of computational Intelligence*, Summer 2006, pp. 176–181.